

长沙市轨道交通2号线列车能耗分析

伍 星 许平洋 王小明 王烟平

(长沙市轨道交通运营有限公司, 410133, 长沙//第一作者, 工程师)

摘 要 以长沙市轨道交通2号为例, 分析了列车空载工况和载客工况下的能耗情况, 结果表明根据列车能耗系统的实时统计数据核实列车能耗的方式是可靠的。在此基础上, 计算分析了列车运行过程中乘客总体重的能耗, 与列车自重能耗相比, 列车自重能耗在列车总能耗中占很大的比重, 因此: 合理地降低车辆自重将成为今后车辆设计的重要课题, 根据线路客流量特点制定大小交路时刻表将成为城市轨道交通运营公司降低运营成本的研究方向。

关键词 城市轨道交通; 列车能耗; 载重量

中图分类号 F530.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.03.026

Energy Consumption Analysis of Changsha Rail Transit Line 2 Train

WU Xing, XU Pingyang, WANG Xiaoming, WANG Yanping

Abstract Taking Changsha rail transit line 2 as an example, the energy consumption of the train under conditions of both no-load and carrying passenger were analyzed. The results show that it is reliable to verify the energy consumption of the train according to the real-time statistical data from the train energy consumption system. On this basis, the energy consumption of passengers in the process of train operation was calculated and analyzed, which was compared with the energy consumption of train body weight. Conclusion has been reached that the energy consumption of train body weight accounts for a large proportion in the total energy consumption of the train. Therefore, reducing the vehicle self weight reasonably will become an important topic for vehicle design in the future, and formulating the schedule for both full-length and short-turn operation according to the characteristics of line passenger flow will become the research direction for urban rail transit operation companies to lower the operational cost.

Key words urban rail transit; train energy consumption; passenger load

Author's address Changsha Metro Operation Co., Ltd., 410133, Changsha, China

1 列车能耗分类及其统计方法

列车能耗=牵引系统能耗+辅助电源系统能耗-电制动时反馈到电网的再生能量。列车运行过程中, 各个牵引、辅助控制单元分别计算其各自的能耗, 并实时将数据传输至列车控制及管理系统(TCMS)。TCMS将各单元能耗累加后显示在司机人机界面(HMI)。

1) 牵引系统能耗。在列车运行过程中, 牵引系统通过监控主电路上的电压传感器和电流传感器信号计算牵引系统能耗。当牵引系统能耗累积达到1 kWh时, 牵引系统控制器(DCU)将通过网络总线发送1 s的牵引能耗脉冲给TCMS, TCMS通过统计牵引系统发送的能耗脉冲个数即可统计得出某一时间段的牵引系统能耗。

2) 辅助电源系统能耗。辅助逆变器(SIV)根据直流输入侧电流、电压计算辅助电源系统能耗。当电量累计达到1 kWh时, 向TCMS发出2 s脉冲, TCMS通过统计辅助系统发送的能耗脉冲个数即可统计得出某一时间段的辅助电源系统能耗。

3) 再生制动能量。在再生制动过程中, 牵引系统通过监控主电路上的电压传感器和电流传感器信号计算再生制动时产生的能量。当再生制动能量累计达到1 kWh时, DCU将发送1 s的再生制动能量脉冲给TCMS, TCMS通过统计DCU发送的再生制动能量脉冲个数即可统计得出某一时间段的再生制动能量。

2 列车空载工况运行时能耗分析

通过采集列车HMI屏上的能耗信息, 即可得到列车在AW0(空载)载荷工况下的能耗。

2.1 列车能耗统计

长沙市轨道交通2号线列车的车辆为B型车, 采用DC 1 500 V接触网受流, 通过VVVF(变压变频)逆变器驱动电机运行。表1为TCMS统计的2

号线 2014 年 4 月 28 日 01-02 车、13-14 车 AW0 载荷工况下列车运行的单程能耗数据,列车 AW0 工况下运行的单程总能耗平均值为 235 kWh。

表 1 TCMS 统计的长沙市轨道交通 2 号线列车 2014 年 4 月 28 日 AW0 工况下运行的单程能耗

车号	运行方向	运行里程/km	牵引系统能耗/kWh	辅助电源系统能耗/kWh	再生制动能量/kWh	总能耗/kWh
01-02	下行	21	330	29	129	230
13-14	上行	22	330	29	126	233
01-02	上行	22	327	28	125	230
13-14	下行	22	323	29	111	241

注:下行方向为光达站—望城坡站,上行方向为望城坡站—光达站

2.2 列车能耗核算

1) 牵引系统能耗核算。牵引系统采用 VVVF 逆变器将 DC 1 500 V 转换成电压、频率可调节的三相交流电驱动牵引电机,牵引功率随运行工况(网压、载重)动态变化。因此,牵引系统功率非定值,只能通过实时测量,牵引系统能耗根据实时测量的牵引系统能耗进行核算。

2) 辅助电源系统能耗核算。辅助供电系统为静止逆变器,输出 AC 380 V 及 DC 110 V 供交流及直流设备使用,列车辅助用电设备的能耗值可根据辅助用电设备的额定功率和使用频率进行估算。估算值与列车 HMI 显示的辅助电源系统能耗进行对比,可核实软件记录的准确性。

(1) 列车直流辅助用电设备的额定功率、使用率和总功率明细如表 2 所示。

(2) 列车交流辅助用电设备功率明细如表 3 所示。

(3) 辅助用电设备能耗数据分析。由表 2 和表 3 统计可知,全列辅助用电设备的总功率=直流辅助用电设备总功率+交流辅助用电设备总功率=51 kW。长沙市轨道交通 2 号线列车从光达站运行至望城坡站的时间约为 40 min,辅助供电系统全程

表 2 列车直流辅助用电设备的额定功率、使用率和功率明细表

类别	直流辅助用电设备	功率/(kW/个)	半列车数量/个	使用率/%	总功率/kW
	用电设备				
照明	司机室照明	0.060	1	0	0
	正常照明	0.020	82	100	1.640
车门	门驱动	0.150	24	5	0.180
	门控制	0.015	24	100	0.360
空调	空调控制器	0.176	3	100	0.528
	紧急通风	1.100	3	0	0
控制系统	司机室监控显示屏	0.025	1	100	0.025
	运行指令	0.300	1	100	0.300
	VVVF 控制	0.500	2	100	1.000
	SIV 控制	0.500	1	100	0.500
	网络控制	0.350	1	100	0.350
	其它控制及损耗	0.300	1	100	0.300
	接触器(包括 HSCB)	0.600	1	100	0.600
	制动控制单元	0.227	3	100	0.681
	风源模块电加热及电磁阀	0.140	1	50	0.070
	ATP/ATC	1.200	0.5	100	0.600
	司机室广播控制机柜	0.100	1	100	0.100
	广播控制盒	0.030	1	100	0.030
乘客信息系统	客室 LCD 显示屏	0.050	24	100	1.200
	LED 动态地图	0.040	24	100	0.960
	客室控制机柜	0.150	3	100	0.450
	司机室媒体监控主机	0.120	1	100	0.120
	车载服务器	0.300	1	50	0.150
	车载交换机	0.030	1	50	0.015
	CCTV 监控屏	0.030	1	100	0.030
	车载无线接收网关	0.150	1	50	0.075
	车载通信控制器	0.110	0.5	100	0.055
	车载无线发射网关	0.220	0.5	100	0.110
车载无线传输系统	客室工业交换机	0.030	2	100	0.060
	蓄电池充电	0.015	1	100	0.015
	头灯、尾灯	0.150	1	50	0.075

注:半列直流辅助用电设备的总功率为 10.579 kW,全列直流辅助用电设备的总功率为 21.158 kW;HSCB 为高速断路器;ATP 为列车自动保护系统;ATC 为列车自动控制系统;LCD 为液晶显示器;LED 为发光二极管;CCTV 为闭路电视

能耗的计算值为 34 kWh,TCMS 根据实时采集数据实测的辅助供电系统全程能耗平均值为 29 kWh,计算值与实测值之间相差 17%。因为计算值取的是

表 3 列车交流辅助用电设备功率明细表

交流辅助用电设备	Tc 车		Mp 车		M 车		M 车		Mp 车		Tc 车	
	数量/台	容量/kVA	数量/台	容量/kVA	数量/台	容量/kVA	数量/台	容量/kVA	数量/台	容量/kVA	数量/台	容量/kVA
空调压缩机	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0
空调冷凝风机	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0
送风机	4	0.75	4	0.75	4	0.75	4	0.75	4	0.75	4	0.75
司机室通风机组	1	0									1	0
制动电阻通风			1	1.10	1	1.1	1	1.1	1	1.1		
空气压缩机					0.5	7.5	0.5	7.5				
外接负载插座	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

注:全列交流辅助用电设备的总功率为 29.9 kVA;在 AW0 状态下,空调仅启动通风机,因此空气压缩机数量按 0.5 台计算

用电设备的额定功率,而在实际运用中设备的功率并未达到其额定值,因此计算值较实测值偏大为正常现象。因此,长沙市轨道交通2号线的列车能耗统计系统的计算逻辑合理,该系统能可靠地记录列车能耗。

3 列车载客工况下运行时能耗分析

通过采集列车HMI屏上的能耗信息,即可得到列车在载客工况下的能耗。将列车载客工况下的能耗与牵引变电所的能耗进行比较。

1) 列车载客工况下能耗统计。表4为TCMS统计的长沙市轨道交通2号线2014年4月28日01-02车、13-14车载客工况下列车运行的单程能耗数据。

表4 TCMS统计的长沙市轨道交通2号线列车
2014年4月28日载客工况下运行的单程能耗

车号	运行方向	运行里程/km	牵引系统能耗/kWh	辅助电源系统能耗/kWh	再生制动能量/kWh	总能耗/kWh
01-02	下行	21	372	54	169	257
13-14	上行	21	407	79	187	299
01-02	上行	21	395	80	164	311
13-14	下行	22	388	69	155	302

2) 载客工况下牵引变电所总能耗统计。表5为长沙市轨道交通2号线牵引变电所日能耗统计表。

表5 长沙市轨道交通2号线牵引变电所日能耗统计表

统计日期	列车运行里程/km	总能耗/kWh	列车运行单程能耗/kWh
2014-04-29	3 756	48 020	281
2014-04-30	4 434	69 607	345
2014-05-01	5 237	69 350	291
2014-05-02	5 541	72 870	289
2014-05-03	5 321	75 110	310

由表4和表5可知,由TCMS统计的列车运行单程的平均能耗和由牵引变电所能耗数据计算的列车运行单程的平均能耗相吻合。

4 列车载客量分析

1) 列车总质量计算。长沙市轨道交通2号线列车空气弹簧压力与载荷(单个空簧的压力)呈线性关系,其线性关系为:载荷=19.3 kN/kPa×(空气弹簧压力-200 kPa)+36.5 kN。单节车车体质量=4×载荷/9.8 N/kg。因此,列车总质量=所有单节车车体质量总和+所有转向架质量总和。拖车一位端和二位端转向架质量分别为4 800 kg、4 795 kg,动车一位端和二

端转向架质量分别为6 999 kg、6 993 kg。

2) 载客量计算。列车载客量(乘客总体重)=列车总质量-列车自重(AW0工况)。根据2014年5月2日长沙市轨道交通2号线列车起动前01-02车的空气弹簧压力计算的列车载客量如表6所示。

3) 列车运行单程乘客数量计算。根据表6中的载客量和各区间长度数据可换算出列车运行单程乘客数量(每人按60 kg算):列车运行单程乘客数量 $=\sum_{i=1}^n [(P_{\text{区间列车载客量},i}/60 \text{ kg}) \times 1\,000 \times L_{\text{区间长度},i}] / \text{线路长度} = 894 \text{ 人}$ (其中,区间数量 $n=18$)。

5 每位乘客单程能耗分析

1) 因线路标高产生的能耗。根据长沙市轨道交通2号线一期工程设计图,2号线一期工程共19座车站,起点站及终点站分别为光达站和望城坡站。其中,光达站左右线的设计标高均为28.250 m,望城坡站左右线的设计标高均为24.950 m,起始站至终点站的设计高差为3.3 m,则列车运行单程因线路标高产生的能耗为1.77 kWh。而列车在AW0工况下运行的单程平均能耗为230 kWh,线路高差产生的能耗占总能耗的比例为0.77%,因此线路标高产生的能耗在计算中可忽略不计。

2) 每位乘客的单程能耗。长沙市轨道交通2号线列车01-02车AW0工况下的单程能耗为230 kWh(见表1),载客894人后运行的单程能耗为311 kWh(见表4),则乘客能耗=载客工况能耗-AW0工况能耗=81 kWh,每位乘客的单程能耗=乘客能耗/乘客数量=0.090 6 kWh。

3) 每位乘客单程能耗核算。

(1) 由上述分析可知,运行单程乘客总体重为53.64 t,列车运行单程总质量=列车自重(AW0工况)+运行单程乘客总体重=251.268 t,其中乘客总体重的占比为21.35%。

(2) 01-02车AW0工况列车运行单程的牵引能耗为327 kWh(见表1),列车载客894人运行的单程牵引能耗为395 kWh(见表4),则894名的乘客单程牵引耗能占比为17.2%。

(3) 以相同的计算方式对13-14车进行计算,13-14车的单程乘客总人数为792人,单程能耗为72 kWh,则每位乘客的单程能耗为0.090 9 kWh,与01-02车计算的数值相差0.3%。因此,每位乘客的单程能耗为0.090 6 kWh是可靠的。

表 6 2014 年 5 月 2 日长沙市轨道交通 2 号线 01-02 车的空气弹簧压力及相应的列车载客量

车站	区间长度/m	空气弹簧	空气弹簧压力/kPa						列车质量/t	列车载客量/t
			Tc	Mp	M1	M2	Mp	Tc		
空载	0	一转	314	259	262	267	287	310	197.628	0
		二转	265	258	248	253	255	267		
光达站—火车南站站	2 035.81	一转	319	281	283	277	294	297	201.587	3.959
		二转	280	271	250	257	259	274		
火车南站站—杜花路站	799.98	一转	343	302	323	308	376	335	220.118	22.490
		二转	312	296	286	287	296	332		
杜花路站—沙湾公园站	1 978.71	一转	334	299	323	309	380	343	220.526	22.898
		二转	313	292	288	291	301	334		
沙湾公园站—长沙大道站	1 188.84	一转	341	321	330	318	405	356	228.444	30.816
		二转	330	298	295	295	330	381		
长沙大道站—人民东路站	2 015.43	一转	356	352	355	332	414	361	238.118	40.490
		二转	366	328	321	313	344	395		
人民东路站—万家丽广场站	1 411.10	一转	368	383	355	386	456	403	252.689	55.061
		二转	406	344	336	334	408	415		
万家丽广场站—锦泰广场站	1 274.29	一转	440	450	405	416	524	430	276.485	78.857
		二转	461	408	372	370	432	469		
锦泰广场站—长沙火车站站	669.02	一转	446	472	452	433	504	427	284.158	86.531
		二转	475	441	401	397	443	474		
长沙火车站站—袁家岭站	1 043.28	一转	493	497	503	453	528	455	300.240	102.612
		二转	495	477	464	428	471	495		
袁家岭站—迎宾路口站	883.29	一转	507	505	512	456	534	468	303.465	105.837
		二转	501	480	466	440	470	499		
迎宾路口站—芙蓉广场站	699.16	一转	510	509	508	477	529	479	306.567	108.939
		二转	503	481	473	458	479	508		
芙蓉广场站—五一广场站	793.98	一转	508	505	524	491	543	479	309.179	111.551
		二转	505	489	479	468	481	506		
五一广场站—湘江中路站	699.31	一转	501	475	490	468	523	479	299.832	102.204
		二转	485	461	454	457	459	497		
湘江中路站—橘子洲站	676.22	一转	495	474	478	468	531	489	301.506	103.878
		二转	486	466	456	467	471	509		
橘子洲站—溁湾镇站	1 126.40	一转	419	395	375	388	370	354	249.465	51.837
		二转	392	366	357	352	381	366		
溁湾镇站—西湖公园站	1 286.07	一转	387	394	351	361	371	344	241.506	43.878
		二转	364	355	355	340	359	339		
西湖公园站—金星路站	1 262.52	一转	370	388	339	352	366	326	236.893	39.265
		二转	356	354	331	338	361	326		
金星路站—望城坡站	1 439.80	一转	341	368	316	335	366	328	228.934	31.306
		二转	335	337	311	301	353	321		

注：“一转”为一位端转向架，“二转”为二位端转向架

6 结论

1) 长沙市轨道交通 2 号线每位乘客的单程(22 km)能耗为 0.090 6 kWh,而列车自重所消耗的能量在载客运行过程中占有很大的比重,因此,如何降低车辆自重将成为今后车辆设计的重要课题。

2) 合理地根据线路客流量特点制定大小交路时刻表将成为城市轨道交通运营公司降低运营成本的研究方向。

参考文献

[1] 邓浩衡,钟碧羿.长沙地铁 1 号线永磁同步牵引列车能耗分析[J].现代城市轨道交通,2017(9):10.

[2] 株洲南车时代电气股份有限公司.长沙市轨道交通 2 号线牵引系统技术规格书[R].株洲:株洲南车时代电气股份有限公司,2013.

[3] 湖南南车西屋轨道交通技术有限公司.长沙地铁 2 号线制动系统维护手册[R].株洲:湖南南车西屋轨道交通技术有限公司,2012.

(收稿日期:2017-11-16)